

# USB Type-C 电力输送和转接驱动器参考设计



## 说明

此 USB Type-C® 电力输送 (PD) 和 USB Type-C® 转接驱动器参考设计输出电压为 5V 至 20V，最大电流为 3A，总输出功率为 60W。转接驱动器支持 USB 3.2 (10Gbps)、USB 3.2×2 (20Gbps) 和 DisplayPort 1.4 (8.1Gbps)。此参考设计用于工业 PC 和 HMI 应用。

## 资源

<a href="#">TIDA-010248</a>	设计文件夹
<a href="#">TPS65994</a>	产品文件夹
<a href="#">TUSB1104</a>	产品文件夹
<a href="#">TUSB1044</a>	产品文件夹
<a href="#">TPS55288</a>	产品文件夹

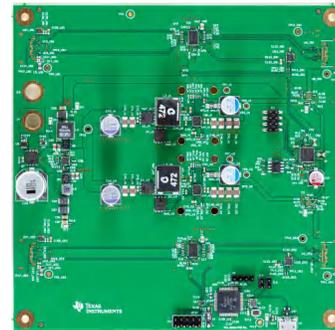
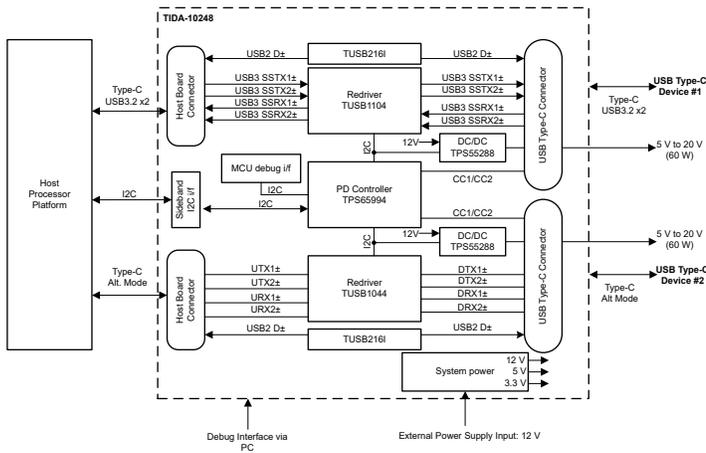


## 特性

- 完整的 USB Type-C 电力输送 (PD) 和转接驱动器参考设计
- 通过 USB Type-C 实现 5V 至 20V PD，输出功率为 60W
- 完全可配置的双端口 USB 4 和 Thunderbolt 4 (TBT4) PD 3.0 控制器
- USB Type-C 10Gbps、USB 3.2 ×2 自适应线性转接驱动器
- USB Type-C 10Gbps 多协议双向线性转接驱动器
- 具有 I2C 控制接口的 5V 至 20V、5A 降压/升压转换器

## 应用

- 工厂自动化和控制
- 单板计算机
- 工业监视器



## 1 系统说明

此参考设计具有 USB Type-C 电力输送控制器、USB 3.2×2 自适应线性转接驱动器和多协议双向线性转接驱动器，可在 5V 至 20V 的电压范围内提供高达 60W 的总功率，最大电流为 3A。转接驱动器支持 USB 3.2 (10Gbps)、USB 3.2×2 (20Gbps) 和 DisplayPort 1.4 (8.1Gbps)。此参考设计可用于工业 PC 和 HMI 应用。

转接驱动器可校正主机和器件之间的信号完整性问题，从而使系统更加稳健。PD 子系统由 USB-PD 控制器和可调降压/升压直流/直流转换器组成。PD 控制器与转接驱动器通信以启用 USB 或 DP 开关路径，还通过 I2C 协议控制直流/直流转换器和转接驱动器。PD 控制器通过配置通道 (CC) 线路与插入 USB Type-C 连接器的 USB Type-C 器件进行交互，从而在转接驱动器中启用相应路径，并在直流/直流转换器中设置所需的电压和电流。

USB Type-C PD 和转接驱动器参考设计可与采用 TI 的 Sitara™ MPU 的 Intel CPU ( Elkhart Lake、Alder Lake、Tiger Lake ) 以及其他具有 USB 3 和/或 DP 功能的 CPU 或 MPU 设计相集成。

## 2 系统概述

### 2.1 方框图

图 2-1 显示了 USB Type-C PD 和转接驱动器参考设计。该设计由重点产品部分中描述的各种子系统组成。PCB 子部分概览如图 2-2 所示，每一框指示一个特定的子部分，例如转接驱动器路径、输入电源、直流/直流转换器、PD 控制器块等等。

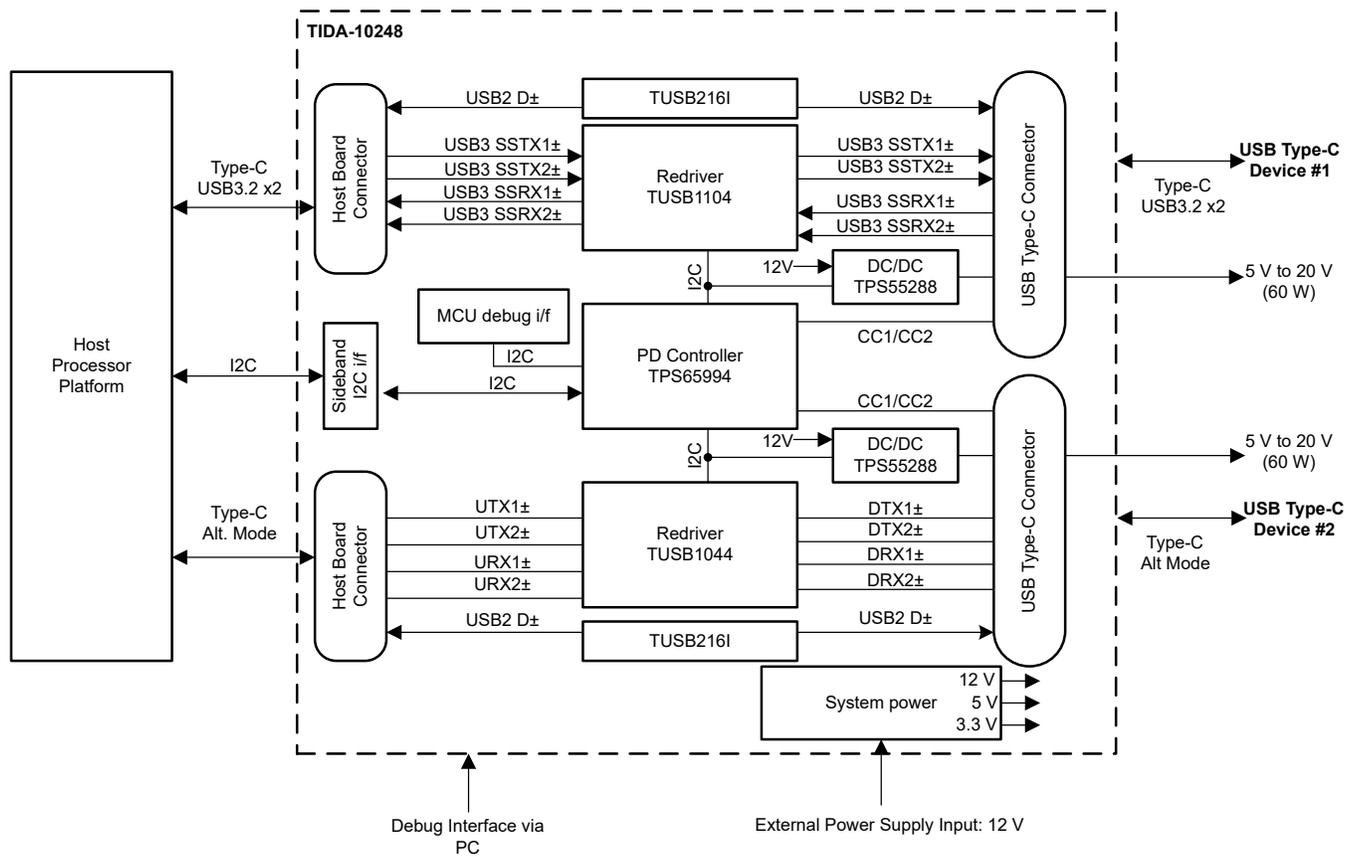


图 2-1. 方框图

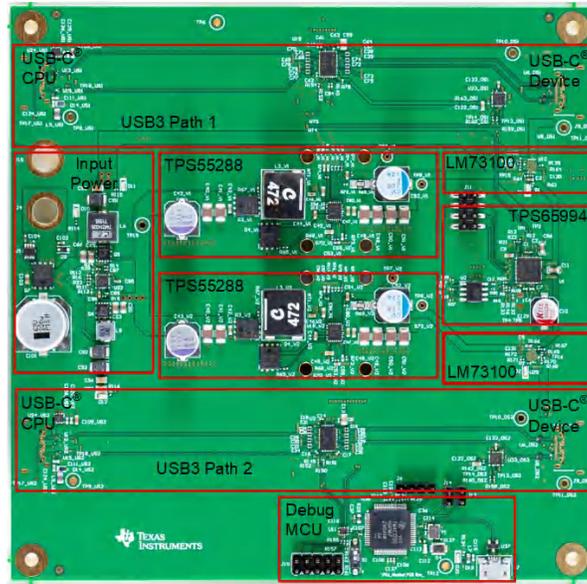


图 2-2. PCB 子部分概览

## 2.2 重点产品

### 2.2.1 PD 控制器 - TPS65994BF

PD 控制器与 USB Type-C 器件通信，以协商电压、电流和交替模式配置。然后，控制器通过 I2C 接口配置直流/直流降压/升压转换器和转接驱动器。此外，PD 控制器使用 I2C 协议向独立处理平台通知所选配置。

### 2.2.2 LM73100

LM73100 器件是一个电源开关，可实现从 TPS55288 子系统到所连接 USB 器件的 5V 至 20V 电压。

### 2.2.3 转接驱动器 TUSB1104

此参考设计中使用的转接驱动器可纠正 USB Type-C 主机和器件之间的信号完整性问题，从而使系统更加稳健。TUSB1104 是一款适用于 USB Type-C 应用的 10Gbps USB 3.2 ×2 线性转接驱动器。

### 2.2.4 转接驱动器 TUSB1044

TUSB1044 是一款线性转接驱动器，支持 USB Type-C 端口信号调节，数据传输速率高达 10Gbps，适用于为 USB Type-C 应用集成的 USB 3.2 和 DisplayPort™ 多路复用器。

### 2.2.5 TUSB216I

TUSB216I 是 USB 2.0 高速信号调节器，支持长达 5m 电缆的通信。两个 TUSB216I 组件连接到这两个转接驱动器，以补偿传输通道中的交流损失（由于容性负载）和直流损失（由于电阻负载）。

## 2.2.6 降压/升压直流/直流转换器 - TPS55288

TPS55288 是一款同步四开关降压/升压直流/直流转换器，能够将输出电压调节为等于、高于或低于输入电压（在本例中为 12V）。PD 控制器与 USB Type-C 连接器之间连接了两个此类直流/直流转换器，每个转换器提供一个 USB Type-C 通道。TPS55288 提供 5V 至 20V 的输出电压，具体取决于 PD 控制器与连接的 USB Type-C 器件协商的电压。PD 控制器通过 I2C 接口与 TPS55288 通信。

## 2.2.7 系统功耗

为该应用提供的标称输入电压为 12V，范围可高达 23V。图 2-3 显示了用于系统电源的组件。

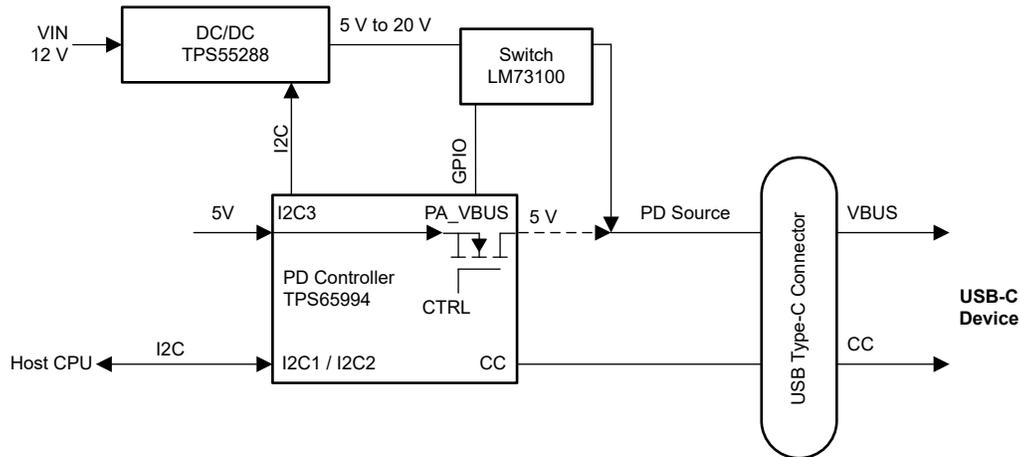


图 2-3. 系统电源树

### 2.2.7.1 反极性保护二极管 - LM74500-Q1

LM74500-Q1 控制器可与外部 N 沟道 MOSFET 配合使用，用作低损耗反极性保护二极管。

### 2.2.7.2 TPS51225

TPS51225 是一款具有 5V 和 3.3V 输出电压的双路同步降压控制器，用于控制外部 MOSFET。该器件支持高效率、快速瞬态响应，并提供内部 0.8ms 电压伺服软启动组合电源正常信号。

### 2.2.7.3 外部 MOSFET - CSD87330Q3D

此外部 MOSFET 可提供高电流、高效率和高频功能。MOSFET 可提供灵活的设计，在与来自外部控制器或驱动器的任一 5V 栅极驱动配套使用时，均可提供高密度电源。

## 2.2.8 上行和下行 USB Type-C® 端口

### 2.2.8.1 下行端口

本参考设计中的 PD 控制器支持两个通道，每个通道都有一个下行端口（DS1 用于第一个通道，DS2 用于第二个通道）。此端口用作连接 USB Type-C 器件的器件接口，这些器件协商来自 PD 控制器的电源和数据。这两个端口均受以下 ESD 组件保护。

#### 2.2.8.1.1 ESD 保护 - TPD6S300A

TPD6S300A 是一款单芯片 USB Type-C 端口保护器件，可提供 20V VBUS 短路过压保护和 IEC ESD 保护。此器件通过在 CC 和边带使用 (SBU) 引脚上提供过压保护，使 CC 和 SBU 引脚可耐受 20V 的电压，而不会干扰正常工作。

### 2.2.8.1.2 ESD 保护 - ESD122

ESD122 是一种双向 ESD 保护二极管阵列，用于保护 USB Type-C 和 HDMI 2.0 电路。该器件的每通道具有较低的 I/O 电容，且引脚排列适合对称差分高速信号布线，因此是保护速率高达 10Gbps 的高速接口的理想选择。

### 2.2.8.2 上行端口

上行 USB Type-C 端口是主机接口，在此参考设计中仅用于评估目的。作为评估的一部分，这些端口用于将 USB Type-C 信号连接到独立的处理器平台，如 Intel CPU、Sitara™ 等等。在典型的工业 PC 应用中，此参考设计集成在单板计算机 (SBC) 或载板上。此外，USB Type-C 转接驱动器信号直接连接到 CPU 或 MPU 的 USB Type-C 端口。

### 2.2.8.3 边带信号接口

边带信号接口是 USB PD 控制器和主机 CPU 之间的 I2C 接口。主机 CPU 可以通过此接口对 USB PD 控制器进行编程并从中获取状态信息。

### 2.2.9 MCU 调试接口

基于 Arm® Cortex® M4F 的 MCU - TM4C123GH6PMTR，仅用作调试接口。并不强制要求硬件开发人员将该器件集成到其设计中。该 MCU 具有一个 USB 2.0 转 I2C 接口。USB 2.0 接口连接到 Microsoft® Windows® PC，该 PC 运行用于 TPS65994 的调试软件以访问 PD 控制器寄存器并对其进行编程。

## 3 系统设计原理

### 3.1 PD 控制器和 I2C 通信

#### 3.1.1 PD 控制器的 I2C 接口 - TPS65994

有三个 I2C 接口，第一个接口将 MCU 调试接口连接到 PD 控制器，并用作 I2C 器件。独立的主机平台接口通过第二个 I2C 接口进行连接，该接口同样用作 I2C 器件。通过使用此接口，主机 CPU (在本例中为 Intel) 指示 PD 控制器提供有关所连接的 USB Type-C 器件的状态信息。第三个 I2C 接口作为 I2C 控制器控制转接驱动器 (TUSB1104 和 TUSB1044) 和直流/直流转换器 (TPS55288)。通过此 I2C 接口，PD 控制器对直流/直流转换器的输出电压进行编程，并控制采用表 3-2 和表 3-3 中所总结的各种配置的转接驱动器。

#### 3.1.2 用于控制直流/直流转换器的 I2C 命令 - TPS55288

表 3-1 中列出的命令控制直流/直流转换器的寄存器设置。

表 3-1. 控制直流/直流转换器的寄存器设置的 I2C 命令

寄存器	PD 控制器触发事件	寄存器名称	数据	备注
0x00h - 01h	POWER_ON_RESET	REF	0xD200h	TPS55288 在器件上电复位时将输出电压调节至 5V
0x02h	POWER_ON_RESET	IOUT_LIMIT	0xE4h	设置 TPS55288 在器件上电复位时的电流限制
0x06h	POWER_ON_RESET	模式	0xB0h	在器件上电复位时启用 TPS55288 输出。
0x00h - 01h	SRC_PDO2_NEGOTIATED	REF	0x9A01h	当协商第 2 个 PDO 时，TPS55288 将输出调节为第 2 个 PDO 指定的电压
0x00h - 01h	SRC_PDO3_NEGOTIATED	REF	0xC602h	当协商第 3 个 PDO 时，TPS55288 将输出调节为第 3 个 PDO 指定的电压
0x00h - 01h	SRC_PDO4_NEGOTIATED	REF	0xC003h	当协商第 4 个 PDO 时，TPS55288 将输出调节为第 4 个 PDO 指定的电压
0x00h - 01h	DETACH	REF	0xD200h	TPS55288 将器件分离时的输出调节至 5V，以便为下一个器件连接准备好自身

#### 3.1.3 用于控制转接驱动器的 I2C 命令 - TUSB1104

表 3-2 中的命令控制转接驱动器 TUSB1104 的寄存器设置。

表 3-2. 控制转接驱动器 TUSB1104 的寄存器设置的 I2C 命令

寄存器	PD 控制器触发事件	寄存器名称	数据	备注
0x0Ah	POWER_ON_RESET	General_1	0x10h	允许软件使用寄存器中的 EQ 设置，而不是从引脚采样的值
0x1Ch	POWER_ON_RESET	AEQ_CONTROL_1	0x84h	禁用自适应 EQ 特性，因为此特性不是本设计的重点
0x21h	POWER_ON_RESET	SS_EQ	0x77h	为面向 USB 主机的 USB3 SSTX1 和 SSTX2 接收器选择 EQ 指数 7。可以根据信号完整性测试的结果更改写入的值
0x0Ah	ATTACH_UU	General_1	0x11h	启用转接驱动器并选择 USB 3.2 ×2 模式的方向 (当以正常方向建立连接时)
0x0Ah	ATTACH_UD	General_1	0x15h	启用转接驱动器并选择 USB 3.2 ×2 模式的方向 (当以翻转方向建立连接时)
0x0Ah	DETACH	General_1	0x10h	在检测到器件分离时禁用转接驱动器

#### 3.1.4 用于控制转接驱动器的 I2C 命令 - TUSB1044

表 3-3 中列出的命令控制转接驱动器 TUSB1044 的寄存器设置。

表 3-3. 控制转接驱动器 TUSB1044 的寄存器设置的 I2C 命令

寄存器	PD 控制器触发事件	寄存器名称	数据	备注
0x0Ah	POWER_ON_RESET	General_1	0x10h	允许软件使用寄存器中的 EQ 设置而不是从引脚采样的值，并禁用转接驱动器

表 3-3. 控制转接驱动器 TUSB1044 的寄存器设置的 I2C 命令 (continued)

寄存器	PD 控制器触发事件	寄存器名称	数据	备注
0x0Ch	POWER_ON_RESET	General_3	0x48h	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 允许软件使用来自寄存器的 VOD 线性范围和直流增益设置，而不是从引脚采样的值</li> <li>2. 为 VOD 线性范围和直流增益选择设置 #2</li> <li>3. 将工作模式设置为 USB + DP 交替模式源</li> </ol>
0x10h	POWER_ON_RESET	UFP2_EQ	0x77h	为 UTX2P、UTX2N 和 URX2P、URX2N 引脚选择 EQ 指数 7。可以根据信号完整性测试的结果更改写入的值。
0x11h	POWER_ON_RESET	UFP1_EQ	0x77h	为 UTX1P、UTX1N 和 URX1P、URX1N 引脚选择 EQ 指数 7。可以根据信号完整性测试的结果更改写入的值。
0x20h	POWER_ON_RESET	DFP2_EQ	0x33h	为 DTX2P、DTX2N 和 DRX2P、DRX2N 引脚选择 EQ 指数 3。可以根据信号完整性测试的结果更改写入的值。
0x21h	POWER_ON_RESET	DFP1_EQ	0x33h	为 DTX1P、DTX1N 和 DRX1P、DRX1N 引脚选择 EQ 指数 3。可以根据信号完整性测试的结果更改写入的值。
0x0Ah	ATTACH_UU	General_1	0x11h	当以正常方向建立连接时： <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 启用转接驱动器并将转接驱动器设置为仅 USB3.1 模式</li> <li>2. 选择正常方向</li> </ol>
0x0Ah	ATTACH_UD	General_1	0x15h	当以翻转方向建立连接时： <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 启用转接驱动器并将转接驱动器设置为仅 USB3.1 模式</li> <li>2. 选择翻转方向</li> </ol>
0x0Ah	DP_CONFIG_ACE_UU	General_1	0x1Ah	当使用引脚分配 A、C 或 E 和正常方向建立连接时： <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 启用转接驱动器并将转接驱动器设置为 DisplayPort 模式的四个通道</li> <li>2. 选择正常方向</li> </ol>
0x0Ah	DP_CONFIG_ACE_UD	General_1	0x1Eh	当使用引脚分配 A、C 或 E 和翻转方向建立连接时： <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 启用转接驱动器并将转接驱动器设置为 DisplayPort 模式的四个通道</li> <li>2. 选择翻转方向</li> </ol>
0x0Ah	DP_CONFIG_BDF_UU	General_1	0x1Bh	当使用引脚分配 B、D 或 F 和正常方向建立连接时： <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 启用转接驱动器并将转接驱动器设置为 USB3.1 和两个 DisplayPort 通道模式</li> <li>2. 选择正常方向</li> </ol>
0x0Ah	DP_CONFIG_BDF_UD	General_1	0x1Fh	当使用引脚分配 B、D 或 F 和翻转方向建立连接时： <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 启用转接驱动器并将转接驱动器设置为 USB3.1 和两个 DisplayPort 通道模式</li> <li>2. 选择翻转方向</li> </ol>
0x0Ah	DETACH	General_1	0x10h	在检测到器件分离时禁用转接驱动器

### 3.1.5 I2C MCU 调试接口

TIVA MCU 调试接口具有一个 USB 转 I2C 接口。应用程序自定义工具可用于通过 TIVA MCU 使用读取/写入寄存器连接 TPS65994。J10 是一个 Aardvark™ 接口，可以选择性地与第三方 USB 转 I2C 接口硬件盒一起使用。此外，U11 开关旨在使 MCU 或 Aardvark 接口能够通过访问 PD 控制器或通过 I2C3 通信，以写入直流/直流转换器或 USB-C 转接驱动器。

### 3.1.6 USB Type-C® VBUS 发电

TPS55288 提供 5V、9V、15V 和 20V 电压。外部 FET 开关 LM73100 将 TPS55288 的电源路径切换到 USB Type-C VBUS。请注意，TPS65994 也可以提供 5V 电压，但仅提供给 USB Type-C VBUS。当电压由 TPS55288 提供时，必须禁用 TPS65994 的内部电源路径。从应用程序自定义工具生成的配置文件可用于禁用内部电源路径。此外，TPS65994 管理 GPIO 以激活 TPS55288 的电源路径。GPIO7 激活电源的端口 1，而 GPIO8 激活电源的端口 2。

## 4 硬件、软件、测试要求和测试结果

### 4.1 硬件要求

验证 USB Type-C PD 和转接驱动器参考设计需要以下硬件组件。

- TIDA-010248 评估板
- 12V、5A 电源
- 两根香蕉电缆为电路板供电
- 两根 USB Type-C 电缆
- TPS65994AD ( QFN 封装 ) 双端口 USB Type-C PD 评估模块
- USB Type-C 无源电缆
- USB Type-A 转 USB Micro-B 电缆
- USB Type-A 转 USB Type-B 电缆
- 具有 USB 2.0、USB 3.2 和 DP 功能的笔记本电脑
- 万用表
- Power DUO 拉电流和灌电流评估模块 (USB-C-PD-DUO-EVM)

### 4.2 软件要求

验证 USB Type-C PD 和转接驱动器参考设计需要以下软件组件：

- TPS65994 应用程序自定义工具 ( 请联系您的 TI 代表获取此工具 )。
- TPS65994 的二进制配置文件，从应用程序自定义工具生成。
- 如果未使用应用程序自定义工具，则为 PC 的 I2C 接口 - 可选：
  - Aardvark 接口
  - USB2ANY 接口 ( USB 转 I2C 调试接口 ) 用户软件

### 4.3 测试设置

以下步骤提供了测试设置的说明：

1. 通过提供 12V 电压为 TIDA-010248 评估板供电。
2. 使用应用程序自定义工具，通过二进制配置文件对 EEPROM 进行编程。
3. 执行下电上电。

#### 4.3.1 验证电力输送的测试过程

以下步骤介绍了验证电力输送的测试过程：

1. 将 **USB-C-PD-DUO-EVM** 插入 TIDA-010248 评估板的 DS1 端口。USB-C-PD-DUO-EVM 是一款电源 DUO 拉电流和灌电流评估模块，用于从 TIDA-010248 评估板拉出或灌入功率。
2. 当通过 USB Type-C 端口连接到 USB Type-C PD EVM 时，USB-C-PD-DUO-EVM 会通电。观察 EVM 通电时亮起的 LED。
3. 按下 USB-C-PD-DUO-EVM 接收板上的 5V、9V、15V 和 20V 按键以请求提供输出电压，并测量 DS1 端口的 USB Type-C VBUS 通道上的相应输出电压 5V、9V、15V 和 20V。
4. 通过将 USB-C-PD-DUO-EVM 连接到 TIDA-010248 评估板的 DS2 端口，重复步骤 1 至步骤 3，以测量第二个通道上的电力输送，还要观察所请求电压的 LED 是否亮起。

## 5 设计和文档支持

### 5.1 设计文件

#### 5.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-010248](#) 中的设计文件。

#### 5.1.2 材料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010248](#) 中的设计文件。

### 5.2 文档支持

1. 德州仪器 (TI)，[TPS65994AD 具有集成式电源开关、支持 USB4 和交替模式的双端口 USB Type-C® 和 USB PD 控制器](#) 数据表
2. 德州仪器 (TI)，[TPS65994AE 具有集成式电源开关的双端口 USB Type-C® 和 USB PD 控制器](#) 数据表
3. 德州仪器 (TI)，[TUSB1104 USB Type-C® 10Gbps USB 3.2 x2 自适应线性转接驱动器](#) 数据表
4. 德州仪器 (TI)，[TUSB1044 USB TYPE-C™ 10Gbps 多协议双向线性转接驱动器](#) 数据表
5. 德州仪器 (TI)，[TPS55288 具有 I<sup>2</sup>C 接口的 36V、16A 降压/升压转换器](#) 数据表

### 5.3 支持资源

[TI E2E™ 支持论坛](#) 是工程师的重要参考资料，可直接从专家获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或提出自己的问题可获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的《使用条款》。

### 5.4 商标

TI E2E™ and Sitara™ are trademarks of Texas Instruments.

DisplayPort™ is a trademark of Video Electronics Standards Association.

Aardvark™ is a trademark of Total Phase, Inc.

USB Type-C® is a registered trademark of USB Implementers Forum.

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited.

Microsoft® and Windows® are registered trademarks of Microsoft Corporation.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 6 关于作者

**PREETI UDAPUDI** : Preeti Udupudi 于 2020 年加入德州仪器 (TI)，目前在德州仪器 (TI) 弗莱辛分公司的工厂自动化和控制团队担任系统工程师，负责对工厂自动化和控制系统中的 HMI 和 USB Type-C 相关主题提供支持。2022 年，Preeti 毕业于德国开姆尼茨工业大学，获得汽车软件工程硕士学位。

**THOMAS MAUER** : Thomas Mauer 是德州仪器 (TI) 弗莱辛分公司的工厂自动化和控制团队的系统工程师，负责开发面向工业领域的参考设计解决方案。Thomas 将其在工业以太网、现场总线和工业应用等工业通信方面的丰富经验带到了目前的职位上。Thomas 在德国威斯巴登应用科技大学获得了电气工程学位 (Dipl.Ing.(FH))。

**CHIH-WEI (ROY) HSU** : Chih-Wei (Roy) Hsu 于 2016 年加入德州仪器 (TI)，现担任德州仪器 (TI) 中国台湾分公司的工业团队现场应用工程师。他为台湾的各种工业客户提供支持，擅长 USB Type-C PD 控制器和高速信号调节。Chih-Wei 于 2016 年获得台湾新竹市国立清华大学电机工程硕士学位。

## 重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司